

文章编号: 2096-1618(2017)05-0524-08

1980–2013 年青藏高原气候时空变化特征研究

周天财^{1,2}, 孙建², 于欢¹

(1. 成都理工大学地球科学学院, 四川 成都 610059; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所生态网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101)

摘要:为研究气候变暖背景下青藏高原的气候变化特征,对青藏高原及周边气象站点(1980–2013年)的气象数据整理分析,采用一元线性回归模型和空间插值分析气候要素的时空变化特征,以滑动 t 检验与 Mann-Kendall 检验对气候要素突变分析。得出(1)最高气温显著上升趋势($0.55\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$),突变(1997年)后增温速率更大。最低气温和平均气温也显著上升趋势,其突变时间节点一致(1995年),且突变前的增温速率均大于突变后的。高温阈值和低温阈值空间上均呈现东南-西北高、东北-西北次之、中间低的分布特征。(2)最大降水非显著下降趋势(-6.22 mm/a),突变(1994年)前降雨增加率更大;而最小降水显著缓慢上升趋势(0.27 mm/a),但突变(2002年)后降雨增加速率更大。最大降水和最小降水阈值在空间上由西北到东南上升,具有明显的条带分布特征。

关键词:气象学;极端气候;温度;降水;青藏高原

中图分类号:P467

文献标志码:A

doi:10.16836/j.cnki.jcuit.2017.05.010

0 引言

全球气候系统正在经历着一次以显著变暖为最主要特征的变化^[1-5]。联合国政府间气候变化专门委员会(intergovernmental panel on climate change, IPCC)目前已经出台了5次关于全球气候变化的评估报告,2013年第五次评估报告结果指出最近一百多年来(1880–2012年)全球地表平均温度上升了 $0.85\text{ }^{\circ}\text{C}$,相比于第四次评估报告增温幅度有所增加。特别是北半球近三十年的平均气温是最近1400年来最高的^[2]。伴随着全球气温的升高,气候突变事件发生的频率和强度可能会增强^[5]。

气候突变事件比气候平均天气状况强度更强,所以对社会经济和生态环境带来的影响更大^[6-9]。青藏高原属于气候变化的敏感区和生态脆弱区^[10],同时也是中国气候变化的启动区^[11],更被誉为是“全球气候变化的驱动机和放大器”^[12],尤其气候变化在21世纪初变化更剧烈,所以研究青藏高原的气候变化更有价值。根据以往的研究情况来看,有关青藏高原气候的研究多将平均气温要素作为主要特征进行研究;气温降雨研究很多^[13-17],1961–2003年青藏高原中部温度显著升高^[18],但数据相对陈旧^[8],且对气温降雨极值的详细研究还比较少,需要加强气候要素突变的时空变化研究。因此,利用青藏高原气象站点1980–2013年的数据研究青藏高原气候要素的时间变化趋势、空间区域差异特征。具体包括最高气温/最大降雨量,最低气温/最小降雨量,平均气温/平均降雨量的时间变

化趋势和空间区域差异特征;进一步揭示气温和降雨突变事件发生时间及空间分布特征。这将有助于青藏高原地区农牧业生产政策制定,同时为进一步研究气候极值成因和预测提供基础参考资料。

1 资料和方法

1.1 研究资料

利用青藏高原及周边地区95个气象站点气象数据分析青藏高原气候要素的时空变化特征,其中包括西藏27个,青海29个,四川18个,甘肃9个,新疆9个,云南3个(图1)。气象数据来源于“中国气象科学数据共享服务网”(http://cdc.cma.gov.cn)国家台站监测数据,包括气象站点每天降雨和温度资料,并将气象资料整理得到研究区年平均降雨和年平均气温,及区域内四季平均气温和降雨。

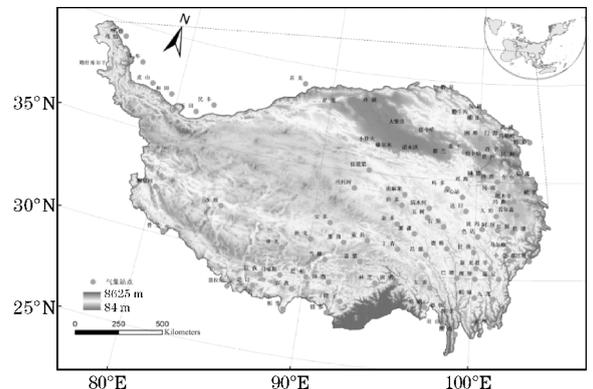


图1 青藏高原气象站点分布示意图

1.2 研究方法

1.2.1 气温降雨极值的定义

根据国际学术规定,气候极值的确定采用某个百分位值作为极值的阈值,超过这个阈值被认为是极值^[19]。根据百分位法的定义即设某个气象要素有 M 个值,将这 M 个值按升序(降序)排列 $X_1, X_2, X_3, \dots, X_m$, 然后按照 Gamma 分布函数^[20] 计算第某个百分位值作为极值的阈值。为研究气温极值空间分布特征,定义两个相对最高和最低气温阈值,其定义方法是将某一个站 1980-2013 年的年平均气温和春夏秋冬四季平均气温分别按升序排列,得到该站第 95(5) 个最高(低)温度的百分位值,将之作为相对最高(低)温度阈值,大于(小于)最高值(最低值)便认为发生气候灾害事件。降水类似。

1.2.2 气候要素的插值方法

由于研究区西北地区气象站点数量有限,并且空间分布是离散。根据其他学者研究,为获得连续有序的空间数据,通常采用克里格插值法(Kriging Methods)。克里金插值法是一种最优内插地质统计格网化方法。它以变异函数和结构分析为基础,在有限区域内数据点较多时,能内插得到无偏最优估计结果。且克里金插值法已经广泛地应用于土壤制图^[21-22]、气象插值等领域^[23-24]。因此,采用克里金插值法得到研究区的气候要素空间分布数据。

1.2.3 气候要素的分析方法

主要采用距平法、曼-肯德尔(Mann-Kendall)法分析气候要素的变化趋势。距平通常用来表示气候变量偏离正常情况的量。一组数据某一个数 X_i 与均值 \bar{x} 之间的差为距平。对各台站气温降水极值距平序列在 Sigmaplot 软件中作线性拟合,研究其变化趋势,在分析各要素变化速率时采用最小二乘法^[25] 对每十年的平均变化程度进行线性趋势计算。

曼-肯德尔(Mann-Kendall)法是一种非参数统计检验方法^[26],此方法能够较为准确地确定符合统计检验的突变时间,避免人为因素影响^[27]。假定时间序列随机独立,统计量定义为^[28]:

$$UF_k = \frac{[s_k - E(s_k)]}{\sqrt{Var(s_k)}} \quad (k = 1, 2, \dots, n)$$

UF_i 是按时间序列 x_1, x_2, \dots, x_n (1980-2013 年) 计算出的统计量(温度和降雨)序列,为标准正态分布;给出显著性水平 a , 如果 $|UF_i| > a$, 则说明序列有明显趋势变化。然后将时间序列 x 逆序 x_n, \dots, x_2, x_1 , 并重复上述过程,同时让 $UF_k = -UB_k$ ($k = n, n-1, \dots, 1$), $UB_1 = 0$ 。分析绘出 UF_k 和 UB_k 的曲线,假如它们超过临界线,则说明显著上升或下降。若 UF_k 和 UB_k 曲线出现交点,并且交点处于临界线之间,那么突

变开始时间为这个交点对应的值。

2 结果分析

2.1 气温的时空变化特征

2.1.1 气温的时间变化趋势

青藏高原 1980-2013 年最高气温上升趋势为 $0.55 \text{ } ^\circ\text{C}/10\text{a}$ (图 2a), 最低气温的倾斜率为 $0.75 \text{ } ^\circ\text{C}/10\text{a}$ (图 2b), 两者都通过 0.05 水平的显著性检验,说明增温趋势显著。同时,最低气温的气温倾斜率大于平均气温的气温倾斜($0.057 \text{ } ^\circ\text{C}/10\text{a}$, 图 2c), 而最高气温的气温倾斜率小于平均气温的气温倾斜率,说明平均气温的上升与低温的升高关系更密切。从年代变化来看,20 世纪 80 年代最高气温、最低气温、平均气温的均值分别为: $26.76 \text{ } ^\circ\text{C}$ 、 $-21.85 \text{ } ^\circ\text{C}$ 、 $4.16 \text{ } ^\circ\text{C}$; 20 世纪 90 年代三者的均值分别为: $27.06 \text{ } ^\circ\text{C}$ 、 $-20.98 \text{ } ^\circ\text{C}$ 、 $4.77 \text{ } ^\circ\text{C}$; 2000-2013 年三者的均值分别为 $27.83 \text{ } ^\circ\text{C}$ 、 $-19.95 \text{ } ^\circ\text{C}$ 、 $5.63 \text{ } ^\circ\text{C}$, 结合距平发现最高气温、最低气温在 20 世纪 90 年代的中后期到 21 世纪初十多年的平均值大于历年平均值,并且对比各个年代的气温倾斜率,发现在 20 世纪 90 年代高温和低温的增温速率最大,分别是 $1.66 \text{ } ^\circ\text{C}/10\text{a}$ 、 $0.88 \text{ } ^\circ\text{C}/10\text{a}$, 在 21 世纪初增温速率略有下降,但气温仍旧呈上升趋势;同时最高气温和最低气温的变化趋势并不一致,最低气温的变化波动更大。

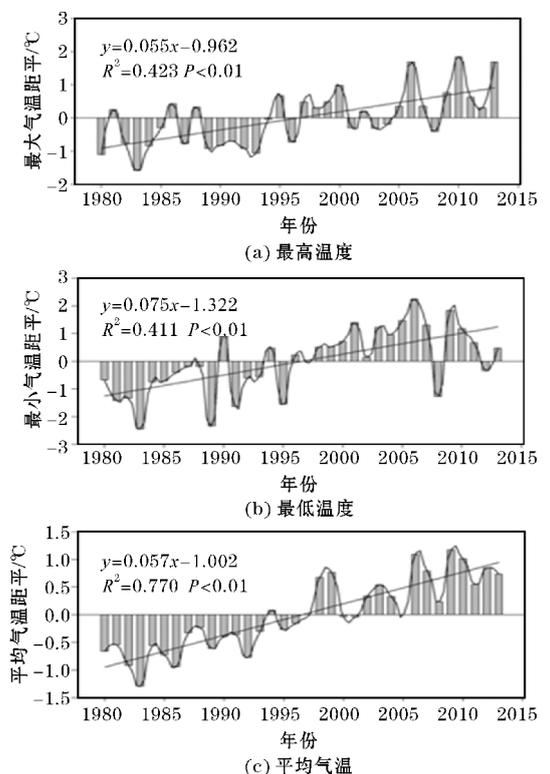


图2 青藏高原距平的逐年变化

根据 M-K 突变检验,最高气温的突变时间是 1997 年(图 3b),最低气温的突变时间是 1995 年(图 3c),最低气温的突变时间和平均气温的突变时间(1995 年)具有一致性。最高气温突变前(1980-1996 年)的气温倾斜率为 $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,突变后(1997-2013)年最高气温的气温倾斜率为 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,突变现象明显,突变后的增温速率是突变前的 2.5 倍。突变前后的平均最高气温的差值为 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。最低气温突变前(1980-1994 年)的气温倾斜率为 $0.78\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。突变后(1995-2013 年)最低气温的气温倾斜率为 $0.4\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,说明 1995 年后最低气温升温的趋势减缓。与最低气温变化率类似,平均气温突变前(1995 年)的气温倾斜率($0.8\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$)大于突变后的($0.4\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$),最低气温和平均气温的突变时间节点和突变前后的增速变化率一致。

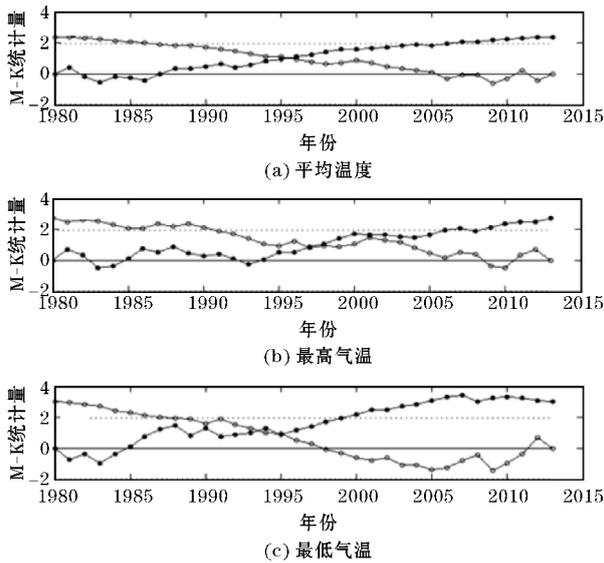


图3 青藏高原 M-K 突变检验曲线

(注:虚线为 95% 临界值, $|U|_{0.05} = 1.96$,下同)

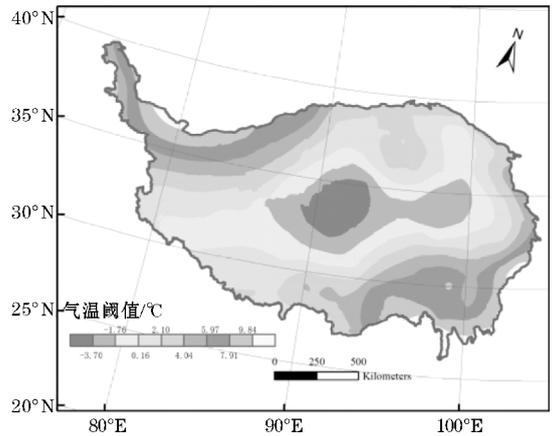
2.1.2 气温在空间上的分布变化特征

最低气温阈值的最低值出现在青藏高原的中部地区(图 4a),以托托河、伍道梁及安多等地为代表,其中托托河的相对低温阈值最低($-7.28\text{ }^{\circ}\text{C}$);最高值出现在高原西北边缘及西南部,分别以新疆南部和田($12.01\text{ }^{\circ}\text{C}$)和四川西南部巴塘($12.00\text{ }^{\circ}\text{C}$)为代表。青藏高原相对最低气温阈值以托托河为最低值中心,分别沿东北-西南方向、西北-东南方向递增,其中沿前者方向的增加速率明显小于后者。

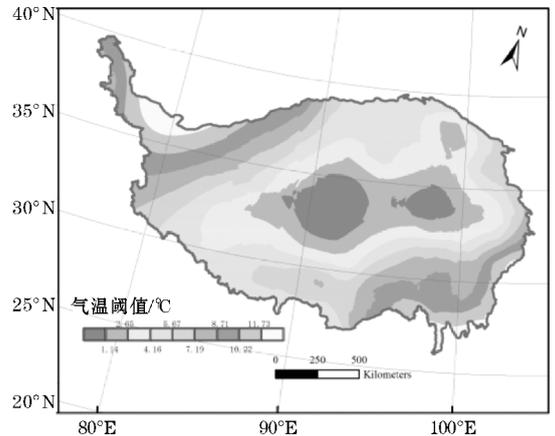
图 4(b)是青藏高原相对最高气温阈值空间变化特征图。青藏高原相对最高阈值的最低值有两个中心,一个是在高原的中部地区,藏北安多($-0.85\text{ }^{\circ}\text{C}$)到青海西南部托托河($-2.29\text{ }^{\circ}\text{C}$)一带。另一个在青海中南部地区,果洛藏族自治州玛多($-2.23\text{ }^{\circ}\text{C}$)到清水河($-2.77\text{ }^{\circ}\text{C}$)一带。相对最高气温阈值的最高值

出现在高原西北边缘皮山($13.72\text{ }^{\circ}\text{C}$)到于田($12.96\text{ }^{\circ}\text{C}$),整个相对最高气温阈值的变化趋势以中部两个低值为中心,分别向东北和西南方向缓慢增加,而向西北和东南方向显著增加。

由于青藏高原特殊的地形地貌,造成相对低温和高温的分布具有明显区域特征。低温地区出现在可可西里五道梁一带,可可西里是青藏高原温度最低地区,其等温线和等高线重叠,自成一闭合的低温中心。



(a) 年度最低气温阈值空间变化图



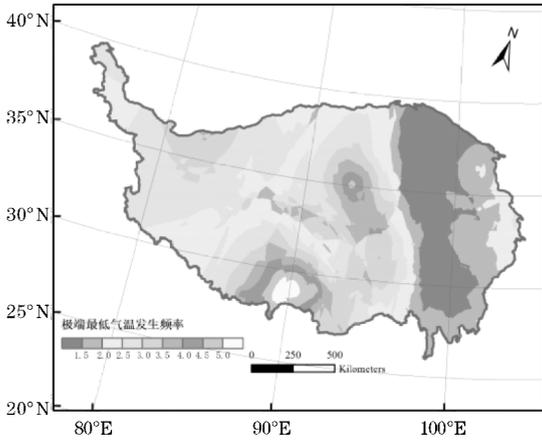
(b) 年度最高气温阈值空间变化图

图4 年度最低气温和最高气温阈值的空间变化图

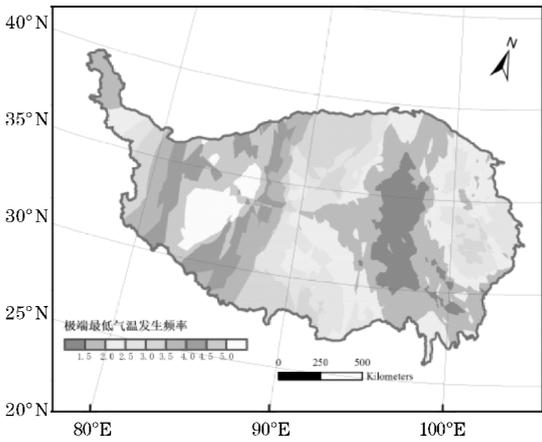
图 5(a)表明低温事件发生频率较高的是在藏南地区的江孜(4 次,1983、1986、1992 和 1997 年)和尼木(4 次,1981、1986、1997 和 2000 年)及柴达木盆地东南部五道梁(5 次,1982、1983、1985、1992 和 1997 年)。在喜马拉雅山脉北侧,特别是珠峰北侧,低温事件的发生频率明显高于整个高原的平均水平,另外在高原偏东北地区事件发生频率低于高原其他地方。而高温事件发生频率较高的地区是西藏地区西部和新疆地区东南部(图 5b),具体主要集中在阿里地区东南部、那曲地区西部和日喀则地区西北部,特别是阿里地区江孜,异常事件的频率(5 次,2006、2007、2009、2010 和 2013 年)。整个高原除新疆南部和西藏中西部外,其余地

方事件发生频率在正常范围内,其中高原中部沿诺木洪-玉树-昌都一带事件发生的频率较其他地方低。

生突变后降水量逐年减少,而 1996 年和 2007 年发生突变后降水量呈上升趋势。



(a) 年度低温事件发生频率空间图



(b) 年度高温事件发生频率空间图

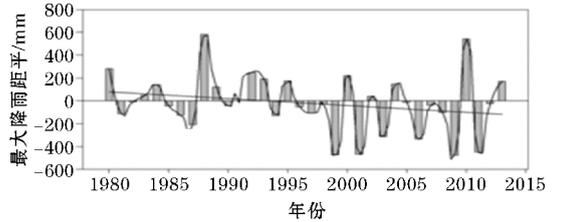
图 5 年度低温事件和高温事件发生频率空间图

2.2 降水的时空变化特征

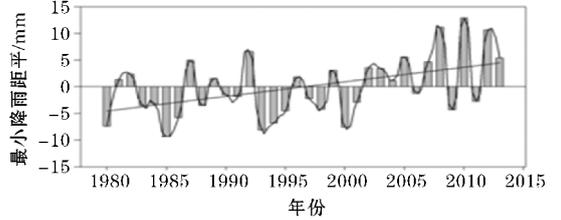
2.2.1 降水的时间变化特征

最大降水呈逐年下降趋势(图 6a),变化率为 -6.22 mm/a 呈逐年减少趋势,但是未通过显著性趋势检验。最小降水呈增大趋势(图 6b),变化率为 0.27 mm/a ,通过 0.05 显著性水平检验。最小降水的变化趋势与平均降水变化趋势(图 6c)均呈上升趋势,但在速率上存在差别。

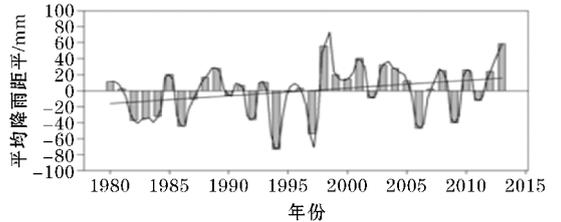
根据 M-K 突变检验,最大降水突变发生在 1994 年(图 7b),突变前降水变化率为 11.3 mm/a ,突变后的降水变化率为 1.82 mm/a ,降水变化率剧烈变化,降水增加速率明显减缓。最小降水量在 2002 年发生突变(图 7c),突变前降水量的逐年变化率为 -0.01 mm/a ,2002 年突变后降水量的逐年变化率为 0.32 mm/a ,突变后最小降水量呈正向增长。而青藏高原的年均降水量存在多次突变(图 7c)。发生突变的时间分别是 1989 年、1996 年和 2007 年,1989 年发



(a) 最大降水距平逐年变化

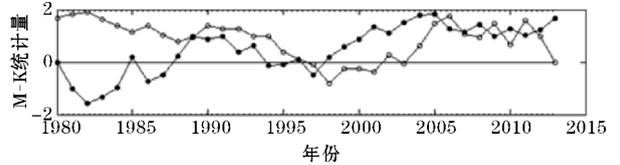


(b) 最小降水距平逐年变化

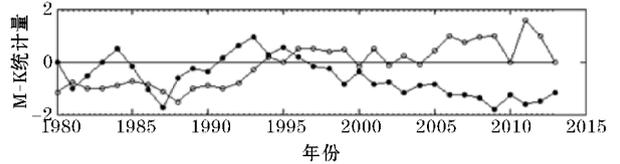


(c) 平日降水距平逐年变化

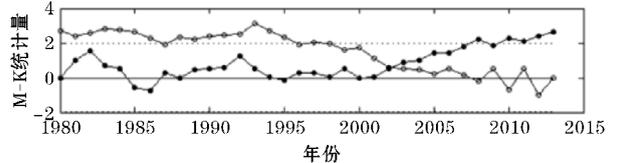
图 6 青藏高原最大降水、最小降水及平均降水的距平逐年变化



(a) 年平均 M-K 突变检验曲线



(b) 年最大降水 M-K 突变检验曲线



(c) 年最小降水 M-K 突变检验曲线

图 7 青藏高原年平均降水、最大降水及最小降水 M-K 突变检验曲线

2.2.2 降水的空间变化情况

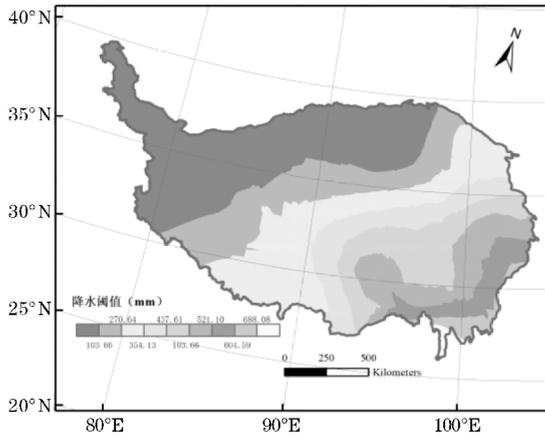
最小降水的阈值空间分布呈现明显条带特征(图 8a)。最小降水阈值的最小值出现在青藏高原的西北部,其中以柴达木盆地的冷湖(6.75 mm)和小灶火(11.64 mm)为代表。沿柴达木盆地西南方向到新疆东南部地区及西藏的西部最小降水的阈值一直处于

较低值,其中新疆南部以民丰(8.82 mm)为典型代表气象站。最小降水的最大值出现在高原的东南一带,以四川都江堰(802.26 mm)、云南维西(752.95 mm),西藏察隅(458.92 mm)为代表。青藏高原的最小降水阈值分布主要呈现西北低、东南高,且沿着西北-东南方向阈值呈上升趋势,高原东北部、中部及中南部最小降水的阈值基本相当。

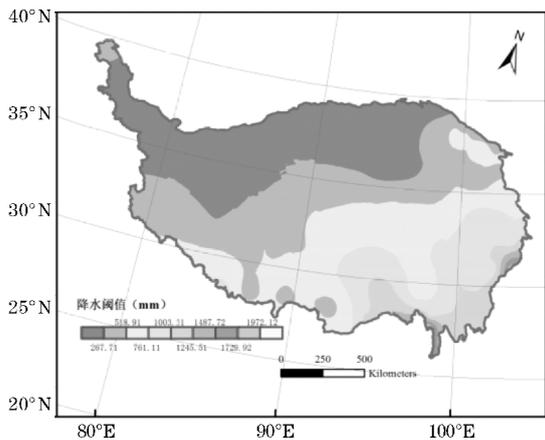
最大降水的阈值空间分布和最小降水的阈值空间分布具有一致性(图8b),但同时也存在一定差异性。一致性体现在阈值的空间分布具有相同的趋势,最小值依然出现在柴达木盆地,并且沿着西南方向一直保持较低值,最大值出现在四川都江堰、云南贡山。差异性体现在西藏中南部的隆子-江孜一带,这一地区的阈值与周围地区明显低很多,青海门源-祁连-野牛沟一带,这一带阈值明显比周围高。

因为云南西北部处于雅鲁藏布江和怒江的下游,所以这个地区也多雨。而青藏高原西北部和柴达木盆地降雨少的原因主要是因为柴达木盆地深处大陆内部,南侧和东侧是青藏高原,高耸的高原阻碍了来自印度洋的西南季风影响盆地,而东侧的高原和山地也使来自太平洋的东南季风无法影响到,南侧有昆仑山脉和北侧有祁连山脉,阻碍了微弱的大西洋和北冰洋水汽进入盆地,缺少外来的水汽输送,导致盆地降水量降低。

图9(a)是相对最小降水事件发生的频率图,青藏高原相对最小降水事件发生频率沿东北-西南方向增加的空间特点,其中在西藏西南部阿里地区发生少雨的事件频率最高,以狮泉河为代表(6次,1982、1991、1996、2004、2007和2009年),发生次数多的柴达木盆地东部,以诺木洪站为代表(7次,1981、1984、1993、1995、2000、2001和2003年),图9(b)是相对最大降水事件发生的频率图,相对最大降水事件较多有东部地区的甘南藏族自治州及高原西部地区,即新疆南部和西藏西部,其中以西藏改则为代表(4次,1980、2002、2008和2010年)。其余地区处于正常范围。



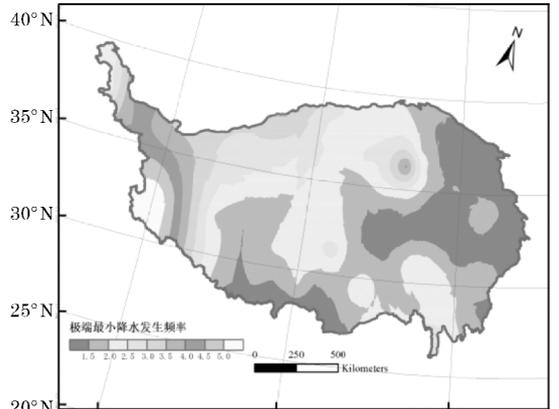
(a) 最小降水阈值空间变化图



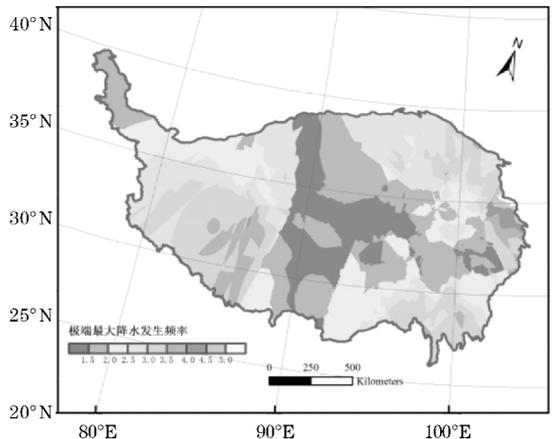
(b) 最大降水阈值的空间变化图

图8 年度最小降水、最大降水阈值的空间变化图

高耸的喜马拉雅山东西走向,缅甸西部的那加山南北走向,构成朝西南开口的马蹄形的地形。每当夏季从孟加拉湾吹来的温暖偏南气流冲入马蹄形的地形后,迫使气流转变成气旋性弯曲,东北风和西南风频率差异不大,形成季风辐合区,造成这一地区多雨。同时



(a) 最小降水事件发生频率图



(b) 最大降水事件发生频率图

图9 年度最小降水事件、最大降水事件发生频率图

3 气候突变特征分析

1980-2013年,青藏高原的气温呈现逐年明显递增的趋势,这一结论与李林等^[29]对青藏高原区域气候变化趋势的研究基本一致。气温倾斜都呈不对称的线性增温趋势,而且最低气温的上升速率比最高气温的增温速率更快^[30]。这也与全球最低与最高气温的研究一致,全球最低温度升高(0.3℃/10a),最高温度升高(0.1~0.3℃/10a)^[31]。20世纪90年代,增温趋势最显著的是最低气温(0.75℃/10a),其次是最高气温(0.55℃/10a),平均气温(0.057℃/10a)。相同的增温趋势出现在1996-2002年,最低温度升温幅度最大(0.20℃),其次最高温度升温幅度(0.085℃)大于平均气温升温幅度(0.003℃)^[32]。气温的突变时间普遍发生在20世纪90年代,具体而言,高温突变发生的时间是1997年,低温突变发生的时间是1995年。不同的研究也指出气温显著突变发生于20世纪90年代中期^[33],气温增幅加速(1991-2007年,0.76℃/10a),特别是1997年后,升温尤为迅速(1.14℃/10a)^[34]。1980-2013年,高原主体降水的增加并不显著,呈现渐进式增加,这与马晓波等^[35]研究结论一致。降雨量的增加主要发生在平均降雨量的增加。长时间序列的降雨研究也得到相似的结论,1961-2006年,年降水量在青藏高原没有显著的增加趋势,降水突变信号明显比温度突变信号弱^[33]。

青藏高原相对最低气温阈值以托托河为最低值中心,分别沿东北-西南方向、西北-东南方向递增。最低气温的空间分布说明了低温事件发生频率较高在藏南地区的江孜和尼木以及柴达木盆地东南部的五道梁。特别是青藏高原南部地区,低温事件的发生频率明显高于整个高原的平均水平,另外在高原偏东北地区由于最低气温阈值的增加导致该地区低温事件发生频率低于高原其他地方。相对最高气温阈值的变化趋势以青藏高原中部两个低值为中心,分别向东北和西南方向缓慢增加,而向西北和东南方向显著增加。因为最高气温阈值在西北方向显著增加,导致高温事件发生频率较高的地区是西藏地区的西部和新疆地区的东南部,包括阿里地区的东南部、那曲地区的西部和日喀则地区的西北部,特别是阿里地区的江孜。此外,因为青藏高原的最小降水阈值的分布规律主要呈现西北低、东南高,且沿着西北-东南方向阈值呈上升趋势,所以相对最小降水事件发生频率主要发生在降雨缺乏的西部地区,且有沿东-西方向增加的空间特点。其中在西藏西南部阿里地区发生少雨的事件频率最高,

以狮泉河为代表,另外少雨事件次数较多的还有柴达木盆地东部,以诺木洪站为代表。相对最大降水事件较多的地方是青藏高原东部地区的甘南藏族自治州及西部地区的新疆南部和西藏西部。其中西藏的改则县最大降水事件较多,但并不能直接用最大降雨空间分布很好的解释,因为一个地区的降水事件除了与降雨量有关,还与不同地区不同的阈值有关。

4 结论

1980-2013年,青藏高原最高气温呈现逐年显著上升趋势,最高气温阈值在空间上呈现东南-西北高、东北-西北次之、中间低的分布特征;最低气温同样表现出显著的上升趋势,且气温变化速率大于最高气温的倾斜率,低温阈值的空间分布特点与高温空间分布类似。时间上,1980-2013年最高气温、最低气温和平均气温均呈现显著的升高趋势。其中,20世纪90年代最高温和最低温的增温速率最大,21世纪初增温速率略有下降,但气温仍旧呈上升趋势;最高气温、最低气温和平均气温的突变时间主要发生在20世纪90年代中期。空间上,最高气温和最低气温阈值都是在高原中部地区呈现较低值,而在高原的西北靠近新疆南部边缘地区和高原东南部靠近四川中南部以及云南西北部的值相对较高。在气象突变事件发生频率上,低温事件和高温事件发生的高频地区分别是拉萨以南到喜马拉雅山脉北侧地区和高原的西部偏东地区。

最大降水呈现逐年下降的趋势,但是趋势不显著;最小降水呈现逐年缓慢显著上升趋势。时间上,最大降水的突变时间在1994年,突变后降水增加速率明显减缓;最小降水量在2002年发生突变,突变后最小降水量呈正向增长;而年均降水量存在多次突变。空间上,最大降水和最小降水在空间上具有明显的条带,条带方向为西北-东南方向,而在数值上呈现由西北向东南方向增加。最大降水事件发生频率较高的地方是新疆的南部和西藏的西部,而最小降水事件发生频率较高的地方是西藏西南部的阿里地区。

参考文献:

- [1] 林而达,许吟隆,蒋金荷,等. 气候变化国家评估报告(II):气候变化的影响与适用[J]. 气候变化研究进展,2007,2(2):51-56.
- [2] 沈国平,王国亚. IPCC第一工作组第五次评估报告对全球气候变化认知的最新科学要点[J]. 冰川冻土,2013,35(5):1068-1076.

- [3] 秦大河, Thomas Stocker. IPCC 第五次评估报告第一工作组报告的亮点结论[J]. 气象变化研究进展, 2014, 10(1): 1-6.
- [4] 赵宗慈, 王绍武, 罗勇. IPCC 成立以来对温度升高的评估与预估[J]. 气候变化研究进展, 2007, 3(3): 183-184.
- [5] IPCC. Working Group I Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report, Climate Change 2013: The Physical Science Basis: Summary for Policymakers[R/OL]. http://www.climat-echange2013.org/images/uploads/WGIAR5SPM_Approved27Sep2013.pdf. 2013-10-28.
- [6] 蔡敏, 丁裕国, 江志红. 我国东部极端降水时空分布及其概率特征[J]. 高原气象, 2007, 26(2): 309-318.
- [7] 陈少勇, 郭江勇, 韩通, 等. 中国西北干旱半干旱区近 46a 秋季气候变暖分析[J]. 中国沙漠, 2009, 29(3): 544-550.
- [8] 翟盘茂, 王翠翠, 李威. 极端降水事件变化的观测研究[J]. 气候变化研究进展, 2007, 3(3): 144-148.
- [9] 赵庆云, 张武, 王式功, 等. 西北地区东部干旱半干旱区极端降水事件的变化[J]. 中国沙漠, 2005, 25(6): 904-909.
- [10] 孙鸿烈, 郑度. 青藏高原形成演化与发展[M]. 广州: 广东科技出版社, 1998.
- [11] 冯松, 汤懋苍, 王冬梅. 青藏高原是我国气候变化启动区的新证据[J]. 科学通报, 1998, 43(6): 633-636.
- [12] 潘保田, 李吉均. 青藏高原: 全球气候变化的驱动机与放大器(III): 青藏高原隆起对气候变化的影响[J]. 兰州大学学报, 1996, 32(1): 108-115.
- [13] Cao L, Pan S. Changes in precipitation extremes over the "Three-River Headwaters" region, hinterland of the Tibetan Plateau, during 1960-2012[J]. Quaternary International, 2014, 321: 105-115.
- [14] You Q, Kang S, Aguilar E, et al. Changes in daily climate extremes in the eastern and central Tibetan Plateau during 1961-2005[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2008, 113(D7).
- [15] Song C, Pei T, Zhou C. The role of changing multi-scale temperature variability in extreme temperature events on the eastern and central Tibetan Plateau during 1960-2008[J]. International Journal of Climatology, 2014, 34(14): 3683-3701.
- [16] Zhang J, Shen X, Wang B. Changes in precipitation extremes in southeastern Tibet, China[J]. Quaternary International, 2015, 380: 49-59.
- [17] Wang S, Zhang M, Wang B, et al. Recent changes in daily extremes of temperature and precipitation over the western Tibetan Plateau, 1973-2011[J]. Quaternary International, 2013, 313: 110-117.
- [18] Liu X, Yin Z Y, Shao X, et al. Temporal trends and variability of daily maximum and minimum, extreme temperature events, and growing season length over the eastern and central Tibetan Plateau during 1961-2003[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2006, 111(D19).
- [19] Plummer N, Salinger M. J, Nicholis N, et al. Changes in climate extremes over the Australian region and New Zealand during the twentieth century[J]. Climatic Change, 1999, 42: 183-202.
- [20] Folland C K, Miller C. Bader Workshop on Indices and Indicators for Climate Extremes, Asheville, NC, USA, 3-6 June 1997, Breakout Group C: Temperature Indices for Climate Extremes[J]. Clim. Change, 1999, 42: 31-41.
- [21] Yang Y, Fang J, Ji C, et al. Stoichiometric shifts in surface soils over broad geographical scales: evidence from China's grasslands[J]. Global Ecology and Biogeography, 2014, 23(8): 947-955.
- [22] Yang Y, Ji C, Ma W, et al. Significant soil acidification across northern China's grasslands during 1980s-2000s[J]. Global Change Biology, 2012, 18(7): 2292-2300.
- [23] Sun J, Cheng G, Li W, et al. On the Variation of NDVI with the Principal Climatic Elements in the Tibetan Plateau[J]. Remote Sensing, 2013, 5(4): 1894-1911.
- [24] Zhang G, Zhang Y, Dong J et al. Green-up dates in the Tibetan Plateau have continuously advanced from 1982 to 2011[J]. Proc Natl Acad Sci U S A, 2013, 110(11): 4309-14.
- [25] 李潮流, 康世昌. 青藏高原不同时段气候变化的研究综述[J]. 地理学报, 2006, 16(3): 337-345.
- [26] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术(第二版)[M]. 北京: 气象出版社, 2007.
- [27] 符淙斌, 王强. 气候突变的定义和检测方法[J]. 大气科学, 1992, 16(4): 482-493.
- [28] 尹恒, 杨占婷, 任玮颖, 等. 基于小波变换和 M-K 检验的灰霾长期变化研究[J]. 科学技术与

- 工程,2012,36(12):9810-9814.
- [29] 李林,陈晓光,王振宇,等. 青藏高原区域气候变化及其差异性研究[J]. 气候变化进展研究,2010,6(3):181-186.
- [30] Karl T R, P D Jones, R W Knight. A New Perspective on Recent Global Warming: Asymmetric Trends of Daily Maximum and Minimum Temperature[J]. Bulletin of American Meteorological Society,1993,74:1007-1023.
- [31] David R E, H Briony, D J Philip. Maximum and minimum temperature trends for the globe[J]. Science,1997,277:364-364.
- [32] Oku Y, H Ishikawa, S Haginoya, et al. Recent trends in land surface temperature on the Tibetan Plateau[J]. Climate,2006,19:2995-3003.
- [33] 丁一汇,张莉. 青藏高原与中国其他地区气候突变时间的比较[J]. 大气科学,2008,32(4):794-805.
- [34] 谭春萍,杨建平,米睿. 1971-2007年青藏高原南部气候变化特征分析[J]. 冰川冻土,2010,32(6):1111-1120.
- [35] 马晓波,胡泽勇. 青藏高原40年来降水变化趋势及突变的分析[J]. 中国沙漠,2005,25(1):137-139.

Spatial and Temporal Patterns of Climate in the Tibetan Plateau (1980-2013)

ZHOU Tian-cai^{1,2}, SUN Jian², YU Huan¹

(1. Chengdu University of Technology, College of Earth Science, Chengdu 610059, China; 2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: In order to study the regional variation characteristics of climatic elements in Tibet Plateau (TP) under the background of global warming, climatic elements datum of the meteorological stations around TP (1980-2013) are analyzed in this paper. A linear regression model and spatial interpolation are used to explore the spatial-temporal characteristics of climatic elements, sliding t test and Mann-Kendall test are applied for abrupt changes analysis. The results show that: (1) The highest temperature shows a significant increased trend ($0.55\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$), a higher increase rate of the highest temperature is found after the abrupt point (1997). The minimum temperature and mean temperature also show significant increase features. The abrupt points of the minimum temperature and mean temperature are 1995, both of them show a higher increase rate before the abrupt point 1995. The spatial distribution of the maximum temperature threshold and minimum temperature threshold present higher in the southeast-northwest, followed by northeast-northwest, then the lowest value in middle region. (2) The highest precipitation show a non-significant decreased trend (-6.22 mm/a), and a higher increase rate of the highest precipitation is found before the abrupt point (1994). In addition, the minimum precipitation shows a significant increased features (0.27 mm/a), and a higher increase rate of the minimum precipitation is found after the abrupt point (2002). The threshold value of the maximum precipitation and minimum precipitation presented a rising trend from the northwest to southeast regions with stripe characteristic.

Keywords: meteorology; extreme climate; temperature; precipitation; Tibetan plateau